



Title	Quantum Algorithms for Multivariate Monte Carlo Simulation: From primitives to applications
Author(s)	森, 瞳美
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/103161
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名（森 瞳 美）	
論文題名	Quantum Algorithms for Multivariate Monte Carlo Simulation: From primitives to applications (多変量モンテカルロシミュレーションの量子アルゴリズム：プリミティブから応用まで)
論文内容の要旨	

量子コンピュータは様々な計算タスクにおいて古典コンピュータを凌駕することが期待されている。量子コンピュータの応用が期待される分野の一つである金融分野においては、特にモンテカルロシミュレーションと呼ばれる汎用的な数値計算手法において二乗加速が示されており、量子アルゴリズム研究の中心的存在となっている。本論文では、特にこの多変数拡張である多変量モンテカルロシミュレーションに焦点を置く。多変量モンテカルロシミュレーションは、複数の確率変数を同時にシミュレーションでき、リスク統合をはじめとする金融における重要な計算タスクに使われる。この多変数拡張は、複数の確率変数に伴う変数間の相関を適切に考慮する必要があることから、単純な拡張では対応できない。量子アルゴリズムの文脈では一部のタスクに特化した研究が行われてきたが、一般的なアルゴリズムは知られていない。本研究では多変量モンテカルロシミュレーションの汎用性の高い量子アルゴリズムを構築する。

本論文では二つのアルゴリズムを提案する。一つ目の方法は量子状態準備というサブルーティンにおいて相関の反映を行う。このアルゴリズムでは、多变数量子信号処理と呼ばれる、量子回路上で多変数多項式変換を効率よく扱える最先端のプリミティブを使用している。このアルゴリズムによって、多变数量子信号処理が適用可能である場合に対して低い計算量が実現される。もう一つのアルゴリズムでは、コピュラと呼ばれる金融において頻繁に用いられる方法を用いて相関を導入する。このアルゴリズムでは一部に量子算術演算と呼ばれるコストのかかる処理が必要になるが、全体として二乗加速は維持しており、一般的の場合に適用可能なアルゴリズムになっている。これら二つのアルゴリズムは相補的であるため、場合によって使い分けることができる。

本論文ではさらに、量子コンピュータへの実装に必要になるリソースの推定も行ない、将来的な量子優位性の実現可能性についても議論している。モンテカルロシミュレーションにおいて二乗加速が証明されているのはクエリ一計算量であり、実際に量子優位性を調べるためにには量子コンピュータの様々なオーバーヘッドを加味する必要がある。本研究では多変量モンテカルロシミュレーションにおいて量子優位性が実現するための条件を特定し、有望な将来の研究方針を示した。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (森 瞳美)		
論文審査担当者	(職)	氏 名
	主査 教授	藤井 啓祐
	副査 教授	山本 俊
	副査 教授	南川 丈夫
	副査 准教授	御手洗 光祐
	副査 准教授	宮本 幸一 (量子情報・量子生命研究センター)

論文審査の結果の要旨

本論文は、金融分野における量子計算応用、とりわけ多変量モンテカルロシミュレーションに焦点を当て、量子アルゴリズムの新規提案とその資源見積もりを体系的に行ったものである。序章では、量子計算の歴史的背景からハードウェア・ソフトウェア両面の発展を整理し、量子信号処理 (QSP) や量子特異値変換 (QSVT) などの基本技術を紹介したうえで、金融計算への応用可能性を明確に位置付けている。特に、金融機関におけるリスク解析やデリバティブ価格評価に広く用いられるモンテカルロ法に注目し、その量子版の実現において鍵となる多変量量子状態生成の課題を的確に捉えている点が高く評価できる。

本研究の主要成果は三点に集約される。第一に、多変量量子信号処理 (M-QSP) に関して既存定理の不整合を指摘し、必要条件を明確化したことにより、今後の理論的基盤を整備した。第二に、M-QSPを利用した効率的な量子状態生成法を構築し、多変量確率分布に基づく量子モンテカルロ法への応用可能性を拓いた。第三に、既知分布を前提とする方法と、未知分布に対しコピュラ法と直交級数展開を組み合わせる方法という二種類のアルゴリズムを提示し、それぞれの利点と適用範囲を明確に位置付けた。さらに、標準正規分布を仮定した単純化モデルを用いて資源見積もりを行い、実用的量子優位を実現するためのボトルネックを明示したことは、実験的研究に対しても具体的な指針を与えるものである。

以上の成果は、量子モンテカルロシミュレーションにおける多変量拡張という極めて重要かつ困難な課題に対して、既存研究の不備を正しつつ新規の理論的枠組みとアルゴリズムを提示し、さらに資源見積もりを通じて実用的量子優位の条件を明確にした点にある。特に、古典・量子の情報変換に伴う計算資源の問題に対して、多変量確率過程の性質を巧みに利用することで解決策を与えていたことは独創的であり、学術的意義が高い。これらの成果は、量子計算理論の発展に資するだけでなく、金融工学をはじめとする産業応用への橋渡しとなる点で分野への貢献も大きい。以上の理由から、本論文は博士（理学）の学位論文として十分な価値があるものと認める。